

VARIACIONES DE LA ESTRUCTURA TÉRMICA VERTICAL EN LAS CERCANÍAS DE LA TROPOPAUSA TROPICAL EN RELACIÓN A LOS CAMBIOS DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

Alejandro LOMAS GONZÁLEZ⁽¹⁾, Ricardo TORRIJO MURCIANO⁽²⁾.

⁽¹⁾ AEMET, Leonardo Prieto Castro 8,
alomasg@aemet.es, rtorrijom@aemet.es

RESUMEN

El acoplamiento océano/atmósfera y la variaciones de la actividad solar tienen incidencia en la estructura térmica vertical de la atmósfera de las zonas tropicales. Apoyándonos en anteriores investigaciones profundizamos en la naturaleza de esos cambios y analizamos las consecuencias de esas interacciones en las propias circulaciones tropicales y subtropicales utilizando datos del reanálisis de NCEP/NCAR de variables como las distintas temperaturas de la alta troposfera y baja estratosfera, y el viento zonal en 1000 hpa, siempre en las zonas tropicales.

Se investiga la hipótesis de que las variaciones de la distribución de temperaturas en distintos niveles atmosféricos tropicales, que están correlacionados con la actividad solar y/o la temperatura de la superficie del mar, pueden afectar a la circulación atmosférica tropical. En concreto, las repercusiones de esa modificación en la estructura térmica vertical parecen afectar a los distintos componentes de las células de Hadley, especialmente a los alisios, hecho que puede modificar no solo los patrones meteorológicos de la circulación general si no también el balance energético de la Tierra. El trabajo consistió en elegir cinco variables anuales de temperatura en distintos niveles de la alta troposfera y baja estratosfera y buscar correlaciones con el viento zonal en superficie. Desde que existen datos aceptables de esas variables, algunas de las mismas, con un año de desfase, presentan correlaciones significativas. Este estudio intenta completar la conclusión de un trabajo anterior en los que se vinculaba la actividad solar con la estructura térmica vertical de los trópicos, provocando cambios en la intensidad de las circulaciones anticiclónicas e indirectamente cambios en el balance radiativo terrestre.

1 INTRODUCCIÓN

El posible efecto de las variaciones de la actividad solar en las distintas variables climáticas se ha estudiado recurrentemente aunque no se ha podido demostrar de forma inequívoca una relación causal que implique cambios sustanciales en el Sistema Climático. Ha habido intentos de relacionar las variaciones en la actividad solar con la dinámica propia de las zonas tropicales y específicamente con las oscilaciones de El Niño Southern Oscillation.

Eddy en 1976 (Eddy, 1976) contemplaba la hipótesis de las posibles conexiones entre la actividad solar y el clima por medio de la huella dejada por la producción de carbono 14 a lo largo de la historia. Concluía que a mayor actividad solar, clima más cálido, y lo relacionaba con la envolvente de la actividad solar.

Los cambios en la irradiancia total solar que se han podido medir desde satélite no parecen ser suficientes para justificar cambios importantes. La observación por satélite de los últimos 30 años también muestra valores muy pequeños de unos 0,017W/m². Otro hecho significativo es que, según Solanki and Krivova (2004), el sol está en un máximo de gran actividad que empezó en torno a 1920.

Hay incertidumbre también en cuanto a la variabilidad que acompaña los cambios en la irradiancia solar total (Ermolli et al., 2013). Recientes medidas de satélite con el Spectral Irradiance Monitor (SIM) muestra que la variabilidad en el ultravioleta sobre la parte descendente del ciclo solar 23 puede ser considerablemente mayor que lo indicado por anteriores estimaciones (Harder et al., 2009 y Haigh et al., 2010).

El Ozono es el gas que incide principalmente en el calentamiento radiativo de la estratosfera y a la vez su ritmo de formación aumenta o disminuye al ritmo de las variaciones de radiación ultravioleta a lo largo del ciclo solar (Haigh, 1994). De esta forma hay pruebas estadísticamente significativas de que en los máximos del ciclo solar aumenta la temperatura en la estratosfera (Frame and Gray, 2010).

Las longitudes de onda del ultravioleta (UV) lejano (120 to 200 nm) y en el medio (200 to 300 nm) son las principales en lo que respecta al calentamiento, composición y cambios dinámicos de la estratosfera. Hay que tener en cuenta que esas longitudes de onda forman una pequeña porción de la radiación entrante pero también son las que muestran las mayores variaciones en los extremos del ciclo solar dentro del espectro. Recientes medidas desde el espacio en estos últimos años apuntan a que las variaciones de irradiancia correspondientes al UV dentro del ciclo solar son probablemente de un 60%. (Ermolli et al., 2013).

La siguiente consideración es que el calentamiento de la estratosfera durante el ciclo solar tiene el potencial de influir a la troposfera indirectamente, por medio del acoplamiento dinámico, y de esta forma al Sistema Climático (Haigh, 1996). La conclusión es que la parte del espectro que corresponde al UV puede tener un impacto en el Clima superior a lo que las variaciones de la irradiancia total pudiera sugerir.

Haigh et al (2005) usaron un análisis de regresión múltiple de datos del reanálisis NCEP/NCAR para mostrar una respuesta, correspondiente a un aumento de la actividad solar, que provoca un debilitamiento y desvío hacia los polos de los chorros subtropicales, con el efecto transmitido verticalmente a la troposfera tanto en lo que respecta a la temperatura como a los vientos zonales. Esta señal es separable de otras influencias como las del ENSO y la NAO, y es similar a los resultados de estudios previos que usaban modelos climáticos globales en los que se incluía el efecto de la variación del ciclo solar de 11 años de la radiación UV. El calentamiento de la parte baja de la estratosfera incrementa la estabilidad estática, haciendo descender la tropopausa. De forma solidaria cambian la localización e intensidad de la corriente en chorro, la trayectoria de las tempestades y la circulación meridiana inducida por las borrascas.

Los patrones exactos de respuesta dependen de la distribución de las perturbaciones del calentamiento de la estratosfera: el calentamiento en las latitudes medias y altas hace que los chorros se muevan hacia el ecuador y se debilitan las células de Hadley mientras que el de las bajas latitudes produce un cambio de los chorros hacia el polo y la expansión de las células de Hadley. También produce un debilitamiento de los chorros subtropicales.

Una cuestión directamente relacionada con la anterior es cómo las variaciones de la actividad solar puede influir en el Pacífico Ecuatorial en ENSO, ya que sus oscilaciones están directamente relacionadas con las variaciones de la presión en esa zona. Gabriel et al. (2007) sugirieron que las circulaciones tropicales se debilitarían en un clima más cálido. El debilitamiento de los alisios llevaría a una circulación tipo El Niño. Este esquema está apuntalada por lo modelos acoplados atmósfera-océano.

Gergis y Fowler (2006) reconstruyeron desde el siglo XVI los fenómenos ENSO. Demostraron la inusual naturaleza de ENSO durante el siglo XX. La máxima actividad de La Niña tuvo lugar durante los siglos XVI y XIX, (años de poca actividad solar y de la Pequeña Edad de Hielo) mientras que el siglo XX es identificado como el período pico de la actividad El Niño. Esta tendencia hacia más actividad ENSO se apuntó en el cuarto informe del IPCC. Trenberth et al. (2007) observaron cómo desde el cambio 1976-1977 a temperaturas oceánicas por encima de lo normal en el Pacífico central y ecuatorial, ha habido una tendencia hacia más largos y fuertes eventos El Niño.

Los autores hemos desarrollado previamente una teoría que relaciona las variaciones de la actividad solar con las de la estructura vertical de la temperatura de la troposfera y estratosfera tropical, que posiblemente modifican las condiciones de las circulaciones típicamente tropicales y subtropicales (Células de Hadley y Walker) (Lomas y Torrijo, 2018). Además de la modificación de la intensidad de las distintas partes de la célula de Hadley, especialmente a los alisios, hecho que puede modificar no solo el balance energético de la Tierra sino también cambiar los patrones meteorológicos de la circulación general. Pretendemos ahondar más en la naturaleza de los cambios de la estructura térmica vertical de la atmósfera tropical.

Se parte de las conclusiones sobre un trabajo anterior de los autores “Posible modulación de las circulaciones anticiclónicas por las variaciones de la actividad solar” en el que se investigan los posibles mecanismos que conectan las circulaciones anticiclónicas subtropicales con la variación de la intensidad solar en las zonas tropicales. Una de las conclusiones fue (Figura 1) la relación (1961-2017) entre el corte de temperaturas de la troposfera superior entre 5°N y 5°S con los vientos zonales en superficie en la zona tropical con más superficie oceánica, 0°-30°S. Es interesante tener en cuenta que en la figura hemos representado con un año de adelanto la variable térmica (desfase lag=-1), de forma que el corte de temperaturas podría ser utilizado como variable predictora. Están señaladas de forma exclusivamente indicativa también las tres erupciones significativas (Agung, El Chichón y Pinatubo) porque también tiene un efecto en la estratosfera.

Apoyándonos en esos antecedentes nuestro actual trabajo es profundizar en la naturaleza de esos cambios y derivar las consecuencias de esas interacciones en las propias circulaciones tropicales y subtropicales utilizando datos del reanálisis de NCEP/NCAR de variables como vientos y temperaturas atmosféricas y oceánicas. La interacción entre todas estas variables parecen afectar a los distintos componentes de las células de Hadley, especialmente a los alisios, hecho que puede modificar no solo los patrones meteorológicos de la circulación general si no también el balance energético de la Tierra.

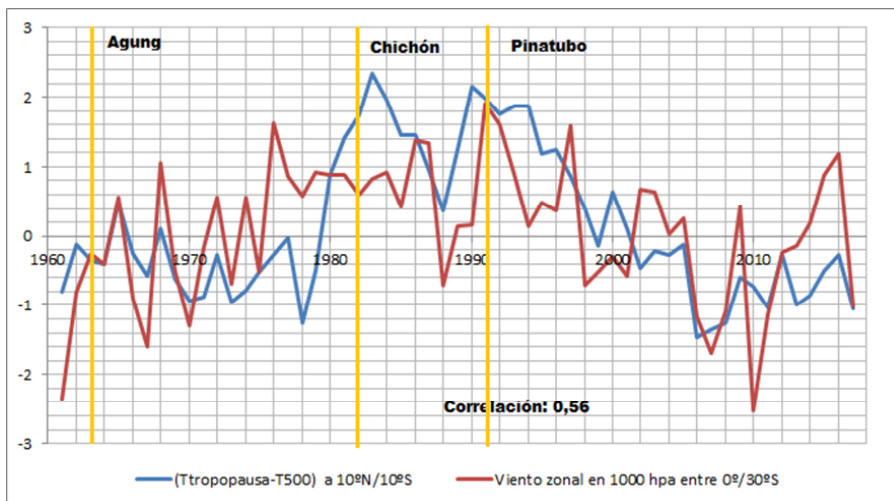


Fig. 1: Medias anuales (1961-2017) normalizadas de las diferencias de temperatura entre 500 hpa y la tropopausa entre los 10°N y los 10°S (con un año de adelanto $\text{lag}=-1$) y por otro lado viento zonal en 1000 hpa entre el Ecuador y los 30°S. Fuente: Reanálisis tomado de NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, de su página web en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Los anticiclones subtropicales son los grandes y principales engranajes de la meteorología tropical y a su vez están en contacto con la circulación de latitudes medias formando parte de la transmisión de energía y momento. Por otra parte los trópicos abarcan prácticamente la mitad de la superficie terrestre, están situados en su mayor parte sobre superficie marina y reciben la mayor parte de la energía que llega del Sol por lo que son candidatos ideales para investigar una posible influencia de la variabilidad solar en su clima y por extensión en el clima de todo el planeta. A ellos hay que unir el efecto modulador o amplificador del ENSO.

2. MÉTODO

Los datos utilizados se han extraído de los dataset siguientes. Del reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996): temperaturas medias normalizadas anuales de la tropopausa, 500 hpa, 150 hpa y 70 hpa (1979-2017). Las variables de temperatura se refieren a la parte alta de la troposfera y la parte baja de la estratosfera, y la zona geográfica analizada se corresponde a la zona terrestre comprendida entre los 20°N y 20°S. La temperatura en 500 hpa se utilizará restando la temperatura de la tropopausa, a partir de ahora se denominará T500-Ttrop. Las demás se denominarán T150 y T70. Se utilizan datos de los años 1979 a 2017 ya que los datos del reanálisis NCEP son dudosos en altura hasta los años setenta.

También de ese reanálisis se ha utilizado el viento zonal medio normalizado anual en 1000 hpa (1979-2017) entre los 5°S y los 25°S. Es una variable representativa (a partir de ahora la denominaré ALISIOS) de los predominantes vientos de componente este de esa zona geográfica (alisios). La razón de utilizar para las variables esas

coordenadas latitudinales es porque en esa zona predominan las zonas oceánicas y están casi ausentes las circulaciones monzónicas que deforman estacionalmente el campo de vientos, afectando más al resultado. Para las temperaturas estratosféricas también se han probado las medidas desde el satélite, en concreto la anomalía de temperatura medida desde satélite en la estratosfera tropical según la Universidad de Alabama/Huntsville (Christy et al 2000). Hay datos de esta variables desde 1979. Llamaremos a esta variable Tuah.

Se hace el análisis de correlación de Pearson entre cada variable de temperatura con el viento zonal en 1000 hpa (ALISIOS) para buscar las posibles conexiones de las variables de temperatura en esos niveles de la atmósfera tropical con la mayor o menor intensidad de la componente zonal del viento en 1000 hpa (ALISIOS) en la zona tropical donde menos interfieren las circulaciones estacionales monzónicas. La razón de esta metodología radica en la búsqueda la relación entre la estructura térmica vertical de partes de la atmósfera tropical con la dinámica de los grandes centros de circulación anticiclónica. Se tiene en cuenta un posible desfase entre esa estructura térmica atmosférica (con un año de adelanto $\text{lag}=-1$) y su acción sobre la propia dinámica de las células anticiclónicas. El desfase de un año entre ambas variables es la elección más sencilla de resultados coherentes, bien entendido que correlación no implica obligatoriamente causalidad.

3. RESULTADOS

En todos los casos las correlaciones son positivas. La comparación de las 5 variables desde 1979 son estadísticamente significativas, con un nivel de significación como mínimo de 0.95 dando valores máximos Ttrop con 0.65 y T500-Ttrop con 0.66 y el mínimo lo aporta Tuah. Hay que aclarar que el geopotencial de la tropopausa oscila en las cercanías de los 100 hpa.

Ttrop	T70	T150	Tuah	T500-Ttrop
0.65	0.60	0.50	0.48	0.66

Tabla 1: Correlaciones entre las distintas variables de temperatura en varios niveles de la atmósfera entre los 20°N y 20°S (con un año de adelanto $\text{lag}=-1$) con el viento zonal en 1000 hpa entre 5° y 25°S global. Fuente: Reanálisis tomado de NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, de su página web en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Es lógica la cercanía de resultados entre las variables Ttrop y T500-Ttrop por compartir la parte correspondiente a la temperatura en la tropopausa. En la Figura 2 he representado las tres variables mejor correlacionadas, Ttrop, T500-Ttrop y T70 desde 1979 (con un año de adelanto $\text{lag}=-1$), y los vientos zonales de 1000 hpa (alisios) entre 5° y 25°S globales representados con un año de adelanto. Hay que tener en cuenta que los valores normalizados significan: para los alisios, valores negativos/positivos vientos alisios más fuertes/débiles y para las variables de temperatura los valores negativos/positivos significan temperaturas más bajas/altas. Se representa con un año de desfase el viento con respecto a las variables de temperatura. Los vientos alisios.

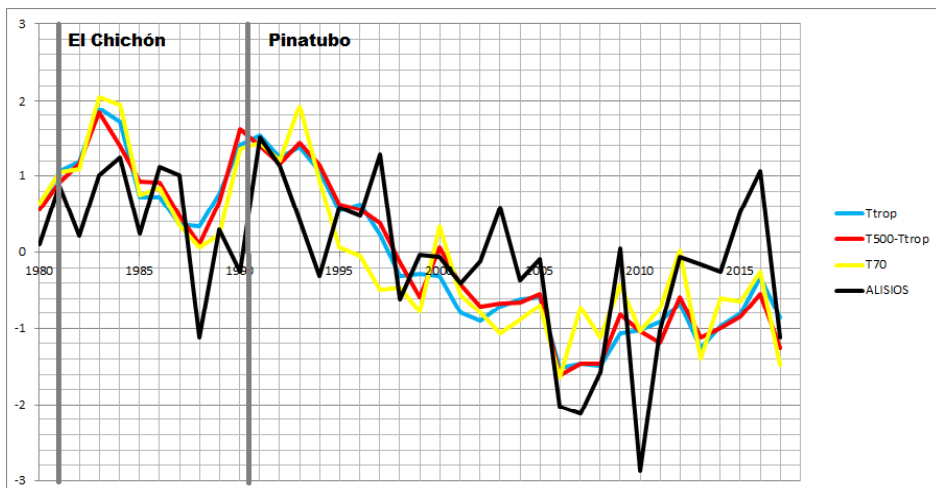


Fig. 2 : Medias anuales normalizadas de las variables T_{trop} , $T500-T_{trop}$, $T70$ entre los $20^{\circ}N$ y los $20^{\circ}S$ globales y $ALISIOS$ (con un año de adelanto $lag=-1$) entre 5° y $25^{\circ}S$ globales. Fuente: Reanálisis tomado de NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, de su página web en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

En la Figura 3 he representado las mismas variables pero recogidas como medias móviles de cinco años. La suavización aclara aún más la correlación de las distintas variables mostrando que esa modulación es también decadal.

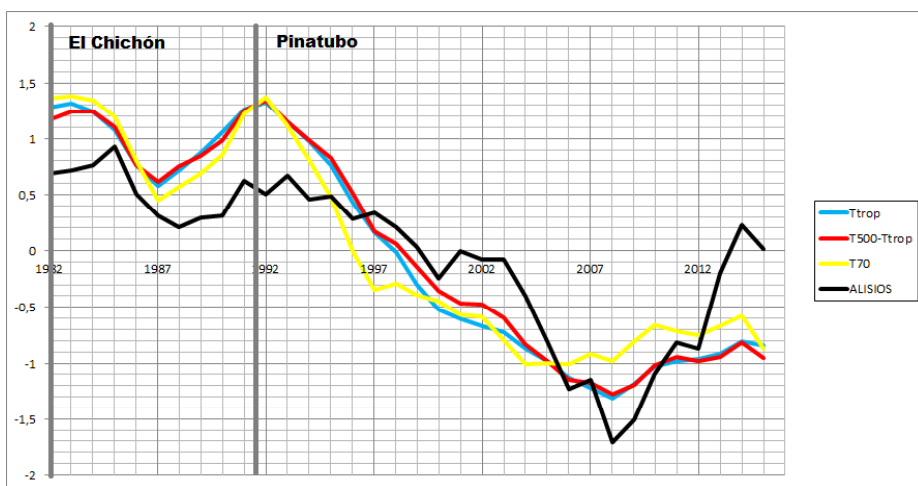


Fig 3: Media móvil de 5 años de las medias anuales normalizadas de las variables T_{trop} , $T500-T_{trop}$, $T70$ entre los $20^{\circ}N$ y los $20^{\circ}S$ globales y $ALISIOS$ (con un año de adelanto $lag=-1$) entre los 5° y $25^{\circ}S$ globales. Fuente: Reanálisis tomado de NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, de su página web en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

sufren mayor varianza por efecto de las oscilaciones del ENSO. También he representado las erupciones de El Chichón (1982) y Pinatubo (1991) ya que por su magnitud afectaron a las temperaturas estratosféricas además de que posiblemente tengan un papel por eso mismo en la activación de ENSO.

4. DISCUSIÓN

Las cinco variables utilizadas son distintas aproximaciones a variables predictoras ya que correlacionan bien con 1 año de desfase de los vientos alisios con respecto a las mismas. Hay que tener en cuenta que esas variables están afectadas por la radiación solar. Dos de ellas corresponden a la estratosfera cuya temperatura está directamente relacionada con la mayor o menor actividad solar. El resultado de 150 hpa es peor dado que también está influido por la temperatura de la superficie del mar además de por la actividad solar. Actuando simétricamente, por un lado el efecto desde arriba, la mayor radiación solar, especialmente el ultravioleta, y por otro el efecto desde abajo, el aumento de la temperatura de la superficie marina, se produciría una realimentación que modificaría sensiblemente el gradiente vertical de temperatura y la estabilidad estática.

En las Figuras 2 y 3 se observan los años más cálidos, ochenta y noventa, que además de estar inmersos en el máximo de actividad solar de la segunda mitad del siglo XX son coincidentes con más actividad ENSO, y el posterior enfriamiento de la alta troposfera y baja estratosfera. El lento calentamiento de los últimos años desemboca en el gran El Niño del año 2015 que provocó una importante desaceleración de los vientos alisios, aunque parece en el 2017 volver poco a poco a la normalidad.

Se parte de la hipótesis estudiada en el anterior trabajo de que la actividad de las células anticiclónicas está relacionada directamente con el perfil atmosférico de las temperaturas que activa la parte ascendente convectiva de las mismas. A partir de esa circunstancia la señal se amplifica en toda la célula y en la interacción océano/atmósfera la mantiene. En conclusión cuando aumentan/disminuyen las temperaturas de la atmósfera tropical, ya sea por la actividad solar o por el aumento de las temperaturas oceánicas, o por ambas razones a la vez, disminuye/aumenta la fortaleza de los anticiclones en todas sus partes. Esto quiere decir que también se ralentizan/aceleran los vientos zonales de superficie (alisios) que son los responsables de la disminución de la temperatura de la superficie del mar, por lo que al aumentar/disminuir la temperatura en toda la columna se mantienen la correspondiente dinámica en toda la zona tropical hasta su decaimiento o desactivación. El elemento desencadenador de las distintas fases del proceso puede tener que ver con variaciones en la actividad solar y su influencia en la alta troposfera y baja estratosfera. Con meses de retraso el efecto de esa mayor/menor radiación solar supone en las zonas de mayor incidencia, que son las tropicales, menor/mayor estabilidad estática en la parte alta de la troposfera. El incremento de la inestabilidad supone un reforzamiento en la vertical de la rama ascendente de la célula anticiclónica que incidirá en el resto de los movimientos de la misma.

Dentro de las zonas intertropicales, el mayor peso dentro de su dinámica general lo ejerce la zona del Pacífico que sustenta los movimientos oscilatorios de ENSO, variaciones que a su vez influyen posteriormente en el resto de las circulaciones de dichas

zonas. Esta circunstancia hace aumentar la complejidad en lo que respecta a la sincronía de los distintos elementos de la dinámica atmosférica tropical.

Los episodios de El Niño están asociados en su comienzo a la disminución de los vientos zonales tropicales (alisios) y el acoplamiento océano/atmósfera conforma finalmente el juego de circulaciones atmosféricas. De forma que toda la circulación tropical, que hay que contemplar como un todo que se mueve en las tres dimensiones (células de Hadley y Walker), acaba condicionada por los distintos patrones de cada episodio, especialmente en el Pacífico. Se parte de la hipótesis de que el comienzo de cada episodio puede venir de diferencias en la estabilidad estática de la atmósfera tropical. La mayor/menor estabilidad estática favorecerá un debilitamiento/reforzamiento de las corrientes ascendentes convectivas en las ramas ascendentes de la célula de Hadley. Esto afectará a los movimientos de toda ella, influyendo en el debilitamiento/reforzamiento de la velocidad de los alisios favoreciendo por su acción el aumento/disminución de la SST. Todo ello es coherente con lo detectado en cuanto al debilitamiento de las circulaciones de Hadley que es acompañado por un movimiento de expansión en latitud. Hay que tener en cuenta que por las dimensiones del propio Océano Pacífico tropical los distintos episodios ENSO tienen repercusión global y afectan al clima en principio del Pacífico tropical y posteriormente al resto de esa área oceánica y otras zonas planetarias. Aquí se contempla también el efecto de la actividad solar en el resto de las células anticiclónicas subtropicales.

REFERENCIAS

- CLIMAP Project Members, 1981, *Seasonal reconstruction of the earth's surface at the last glacial maximum*. Geological Society of America, Map and Chart Series, **36**, 18 pp, <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/metadata/noaa-ocean-2516.html>
- Eddy J.A., 1976, *The Maunder Minimum*. Science. 192 (4245): 1189–1202, <https://doi.org/10.1126/science.192.4245.1189>
- Ermolli, I., Matthes, K., Dudok de Wit, T., Krivova, N. A., Tourpali, K., Weber, M., Unruh, Y. C., Gray, L., Langematz, U., Pilewskie, P., Rozanov, E., Schmutz, W., Shapiro, A., Solanki, S. K., and Woods, T. N., 2013, *Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling*, Atmos. Chem. Phys., **13**, 3945–3977, <https://doi.org/10.5194/acp-13-3945-2013>, 2013.
- Frame, T.H. and L.J. Gray, 2010, *The 11-Yr Solar Cycle in ERA-40 Data: An Update to 2008*. J. Climate, **23**, 2213–2222, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3150.1>
- Gabriel A. V., Soden, B.J.. 2007. *Global Warming and the Weakening of the Tropical Circulation*. Journal of Climate **20**(17): 4316–4340, <https://doi.org/10.1175/JCLI4258.1>
- Gergis, J. , Braganza, K. , Fowler, A. , Mooney, S. and Risbey, J. , 2006, *Reconstructing El Niño–Southern Oscillation (ENSO) from high-resolution palaeoarchives*. J. Quaternary Sci., **21**: 707–722, <https://doi.org/10.1002/jqs.1070>
- Haigh, J. D., Winning, A., Toumi, R. & Harder, J. W., 2010, *An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate*. Nature **467**, 696–699, <https://doi.org/10.1038/nature09426>.

- Haigh, J.D., 1994, *The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate*. Nature volume 370, pages 544–546 (18 August 1994). doi:10.1038/370544a0
- Haigh, J.D., 1996, *The Impact of Solar Variability on Climate*. Science 17 May 1996: Vol. 272, Issue 5264, pp. 981-984. <https://doi.org/10.1126/science.272.5264.981>
- Haigh, J.D., M. Blackburn, and R. Day, 2005: *The Response of Tropospheric Circulation to Perturbations in Lower-Stratospheric Temperature*. J. Climate, 18, 3672–3685, <https://doi.org/10.1175/JCLI3472.1> Held, I.M., Soden, B.J., 2006, *Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming*. Journal of Climate Vol. 19: 5686-5699, <https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- Harder, J. W., Fontenla, J. M., Pilewskie, P., Richard, E. C. & Woods, 2009, T. N. *Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared*. Geophys. Res. Lett. 36, L07801, <https://doi.org/10.1029/2008GL036797>
- John R. Christy et al (2000). MSU Tropospheric Temperatures: Dataset Construction and Radiosonde Comparisons. J Atmos Ocean Technol. September 2000 . Vol 17, 1153-1170, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017%3C1153:MTDCA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017%3C1153:MTDCA%3E2.0.CO;2)
- Kalnay et al (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2)
- Kiyotaha Shibata K., Kodera K. , 2005, *Simulation of radiative and dynamical responses of the middle atmosphere to the 11-year solar cycle*. Journal of atmospherica and Solar-Terrestrial Physics. Vol.67. Issues 1-2, January 2005 Pages 125-143, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.07.022> Lockwood, M., *Solar change and climate: an update in the light of the current exceptional solar minimum*. Proc. R. Soc. A 466, 303–329 (2010), <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0519>
- Lomas A. y Torrijo R., 2018. XXXV Jornadas Meteorológicas de la Asociación Meteorológica Española., Posible modulación de las circulaciones anticiclónicas por las variaciones de la actividad solar <https://goo.gl/jPPbFJ>
- Solanki S.K. and Krivova N.A., 2004, *Solar Irradiance Variations: From Current Measurements to Long-Term Estimates*. Solar Physics (2004) 224: 197–208. <https://doi.org/10.1007/s11207-005-6499-8>
- Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P., Mote, P.W. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change. Chapter 3 in S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (Contributing author: Mote)